

Armadillo Vault – Ein komplexes Gewölbe aus 399 Steinen

Armadillo Vault – A Complex Shell Structure Consisting of 399 Stone Blocks

Philippe Block, Tom Van Mele,
Matthias Rippmann, Matthew DeJong
John Ochsendorf, Matt Escobedo
David Escobedo

Fotos: Anna Maragkoudaki, Iwan Baan,
Aman Johnson, David Escobedo, Nick Krouwel



Das Motto »Beyond Bending« der Architekturbiennale 2016 in Venedig steht für die Logik druckbeanspruchter Formen, die nicht nur durch ihre expressive Formsprache gekennzeichnet sind, sondern auch durch ihre aus der Geometrie herrührende tragstrukturelle Effizienz. »Armadillo Vault« ist das zentrale Objekt dieses Ausstellungsbeitrags in der Corderie dell'Arsenale. Das unbewehrte Steingewölbe besteht aus 399 Kalksteinblöcken, die ohne mechanische Verbindungen oder Mörtel verbaut wurden (Abb. 1, 2). Das Steingewölbe überspannt eine Fläche von 75 m² und verfügt über eine maximale Spannweite von mehr als 15 m bei einer Minimaldicke von nur 5 cm. Die bestehenden Stützen des denkmalgeschützten Gebäudes werden von zwei großen Gewölbeöffnungen umspielt (Abb. 3). Eine Öffnung wölbt sich einseitig nach unten zum zentralen Auflager. Diese Geste verstärkt die skulpturale Wirkung, sorgt vor allem aber durch die zusätzliche lokale Krümmung für eine erhöhte Stabilität (Abb. 4). Der Grundriss basiert auf einer Dreiecksform mit drei externen Auflagern aus Stahlblechen und einem internen Linienauflager aus Zugstangen. Die 20 mm dicken Stahlbleche sind so dimensioniert, dass sie das Gewicht des 23,7 t schweren Gewölbes gleichmäßig auf den sensiblen Boden abtragen, der maximal mit 600 kg/m² belastet werden darf. Da eine Verankerung im Boden nicht möglich ist, wurde ein System aus Stahlzugstäben installiert, das den Horizontalkräften an den Auflagern entgegenwirkt. Die Zügelemente sind nicht unter einem Doppelboden versteckt, sondern offenliegend, um das visuelle Begreifen des Tragsystems zu ermöglichen.

Tragwerksentwurf und Analyse

Die spezielle Geometrie des Gewölbes sorgt für die Stabilität der Struktur, die nur auf Druck beansprucht wird und wie ein komplexes dreidimensionales Puzzle im Gleichgewicht steht. Die Form ist das Resultat von Formfindungs- und Optimierungsprozessen, die auf der sogenannten Stützlinien-Netzwerk-Analyse aufbauen (Abb. 7).

Diese neuen, computerbasierten Methoden ermöglichen den tragwerksgestützten Entwurfsprozess von (invertierten) Hängemodellen, vergleichbar mit Antoni Gaudís oder Heinz Islers Techniken zur physischen Formfindung. Das dominante Eigengewicht des Gewölbes wurde als formbildende Last berücksichtigt, um die mittlere Flächengeometrie zu ermitteln. Über die Zuordnung lokaler Gewölbedicken ergeben sich die Außen- und Innenflächen der Struktur. Die notwendige minimale Materialstärke der Kalksteinelemente beträgt 5 cm und wurde experimentell ermittelt, um Abplatzungen an den Kontaktflächen aufgrund exzentrischer Kraftverteilung zu vermeiden. Aus tragstrukturellen wie aus ästhetischen Gründen ist die Gewölbedicke nicht konstant, sondern beträgt 8 cm an den äußeren Rändern und 12 cm am zentralen Linienauflager. Die Gewölbehülle ist durch die Innen- und Außenflächen definiert und in Steinreihen bzw. in einzelne Gewölbesteine unterteilt (Abb. 10). Ein versetzter Verband der Steine und deren Ausrichtung in Steinreihen unter Berücksichtigung der Kraftflüsse und Auflagerbedingungen garantieren ein stabiles Ineinandergreifen der Elemente innerhalb der Gewölbeschale. Die Standsicherheit des unbewehrten, mörtellosen Gewölbes wurde unter Berücksichtigung punktueller Lasten, Auflagerverschiebungen und Erdbebenbelastungen mithilfe der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) analysiert und nachgewiesen.

Geometrie und Fabrikation

Aufgrund des engen Zeitplans und der großen Anzahl von Gewölbesteinen lag für den Fabrikationsprozess das Hauptaugenmerk auf der Reduzierung der für jeden Steinblock benötigten Zuschnittszeit. Zudem war eine hohe Fertigungspräzision erforderlich, um die Passgenauigkeit auch ohne Mörtelbett zwischen den Gewölbesteinen zu gewährleisten. Die Oberseite jedes Gewölbesteins ist eben und resultiert aus der flachen Unterseite des ursprünglichen Steinquaders, der so während des Bearbeitungsprozesses nicht gewendet werden muss. Die Gewölbeunterseite ist durch eng nebenein-

anderliegende Kreissägeblattschnitte geformt (Abb. 5). Die entstehenden kammartigen Steinfinnen wurden nachträglich manuell abgeschlagen, um eine rau strukturierte, doppelt gekrümmte Oberfläche zu erzeugen (Abb. 6). Die seitlichen, orthogonal zur lokalen Krafrichtung ausgerichteten Kontaktflächen sind Regelflächen, verfügen über eine formschlüssige Nut-/Federverbindung und wurden mittels maßgeschneiderter Fräswerkzeuge bearbeitet. Dieser Formschluss der annähernd horizontalen Fugen dient primär dem geometrischen Referenzieren während des Aufbaus, verhindert aber auch ein mögliches lokales Verrutschen der Gewölbesteine. Die restlichen Kontaktflächen wurden mit einfachen, geraden Schnitten bearbeitet.

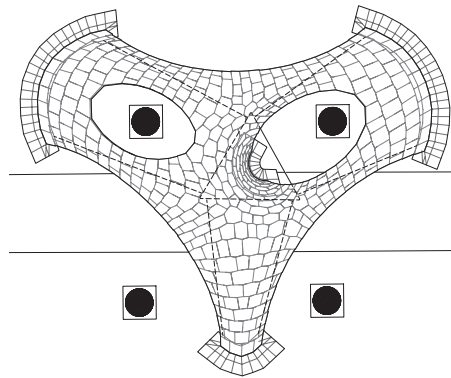
Um die komplexen Krümmungen der Unterseite der Steine einfach herstellen zu können, ist die Kontur aller Gewölbesteine in der Aufsicht als konvexes Polygon meistens als Sechseck ausgebildet. Bei konkaven Polygonen wäre der effiziente Zuschnitt mittels Kreissägeblatt geometrisch nicht möglich. Da das Gewölbe mehrere Bereiche mit negativer Gaußscher Krümmung aufweist, kann dessen Geometrie, mit ebenen Flächen aus konvexen Polygonen nicht abgebildet werden. Aus diesem Grund sind die Außenflächen benachbarter Steine geometrisch entkoppelt und bilden so eine schuppenartige Struktur auf der Gewölbeaußenseite.

Konstruktion

Die ausführende Firma errichtete die Konstruktion zunächst testweise an ihrem Firmensitz in Buda (Texas), um die beteiligten Steinmetze mit dem Aufbauprozess vertraut zu machen. Während die Gewölbesteine manuell versetzt wurden – beginnend an den Auflagern bis hin zu den Schlusssteinreihen –, hat ein Lehrgerüst aus einem Standardgerüstsystem und einer aufliegenden, maßgeschneiderten Holzgitterkonstruktion jeden Gewölbestein gestützt (Abb. 8). Dabei gewährleisteten die Vermessung mittels Tachymeter, Markierungen auf den Steinseitenflächen und hölzerne Ausgleichskeile zwischen Steinunterseite und Lehrge-



2



3

- 1 Das Gebäude hat eine Spannweite von 15 m bei einer Dicke von lediglich 5 cm.
 - 2 Die 399 Steinblöcke sind ohne Mörtel oder mechanische Verbindungen verbaut.
 - 3 Dachaufsicht Maßstab 1:500
Zwei Öffnungen in der Gewölbefläche umschließen die bestehenden Stützen (Zugstangen am Boden gestrichelt).
 - 4 Stahlzugstangen wirken den Horizontalkräften an den Auflagern entgegen.
- 1 The vault has a span of 15 m in various directions and a minimum thickness of only 5 cm.
 - 2 The 399 stone blocks are laid without mortar or structural connections.
 - 3 Top view of vault scale 1:500
Two openings in the vault allow it to be drawn round the existing columns in the listed space. Steel floor ties are shown with dotted lines.
 - 4 Steel tie members resist horizontal loads at the bearing points.

rüst die exakte Positionierung jedes Steins (Abb. 9). Um kumulierende Fertigungs- und Aufbauungenauigkeiten zu kompensieren, wurden die Schlusssteine auf Basis präziser Messungen der fast vollständig montierten Struktur vor Ort auf Maß zugeschnitten. Damit die Genauigkeit der Konstruktion beim erneuten Aufbau wieder erreicht werden kann, war es erforderlich, vor dem Absenken des Lehrgerüsts die gebaute Geometrie des vollständigen Gewölbes zu vermessen und die Position jedes Steins relativ zum Nachbarstein auf den Kontaktflächen zu markieren. Eine spezifische Absenkungssequenz, die nacheinander alle Gerüstbereiche einschließt, gewährleistete das sukzessive, möglichst

gleichmäßige Absenken des Gewölbes. Das Gewölbe war selbsttragend, sobald sich die Holzkeile zwischen dem Lehrgerüst und den Steinen anfangen zu lösen. Schlussendlich wurden die Steine mit dem Lehrgerüst zum eigentlichen Ausstellungsort in Venedig verschifft, wo der Aufbauprozess erneut von den gleichen Spezialisten und Arbeitern in weniger als drei Wochen durchgeführt wurde. Nach Ablauf der Architekturbiennale wird die Steinstruktur demontiert und an ihrem finalen Bestimmungsort erneut aufgebaut.

Schlussbemerkungen

»Armadillo Vault« steht für die enge Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren, Entwerfern

sowie erfahrenen Steinmetzen und Baumeistern. Die Struktur stellt eine herausragende Errungenschaft nach über zehn Jahren der gemeinsamen Erforschung innovativer Steinkonstruktionen dar. Sie demonstriert, dass mittels fortschrittlicher, maßgeschneiderter Ingenieurarbeit und neuartiger, tragwerksgestützter Entwurfsmethoden expressive Formen entworfen, analysiert und sicher konstruiert werden können. Mit der Filigranität einer Eierschale und frei von jeglicher Stahlbewehrung steht die fluide Steinform sicher und fordert unser Verständnis hinsichtlich formal expressiver Architektur heraus, deren Umsetzung allzu oft mit einer ineffizienten Nutzung der verwendeten Baumaterialien einhergeht.



4



- 5 Die gekrümmte Innenseite wurde mittels Kreissägeblatt durch sukzessive Einschnitte geformt.
- 6 Die verbleibenden, kammartigen Steinrippen wurden von Hand abgeschlagen. Es entstand eine grobe, doppelt gekrümmte Steinunterseite.
- 7 a Der Lageplan repräsentiert die möglichen Kraftverläufe.
b Der Kräfteplan repräsentiert die Größe der Horizontalkräfte.
c Verteilung der lokalen Gewölbbestärke
d lokale Spannungsverteilung
- 5 Curved inner face (intrados) shaped by cutting a series of fins with a circular saw
- 6 The comb-like fins on the underside are hammered off manually to create a rough-textured, double-curved surface.
- 7 a Layout diagram showing distribution of forces
b Layout diagram showing horizontal loads
c Distribution of various thicknesses of vault
d Local stress distribution

The "Beyond Bending" exhibition at the 2016 Architecture Biennale in Venice advocates the logic of compression-only structural forms, not only because of their uniquely expressive aesthetics, but also in view of their potential for efficiency and the stability resulting from their geometry. The centrepiece of the exhibition in the Corderie dell'Arsenale, the Armadillo Vault, is an unreinforced, stone structure comprising 399 cut limestone blocks assembled without structural connections or mortar. The vault, covering an area of 75 m² and spanning more than 15 m in various directions, has a minimum thickness of only 5 cm. Its shape is roughly triangular on plan, with four linear supports – three along the edges

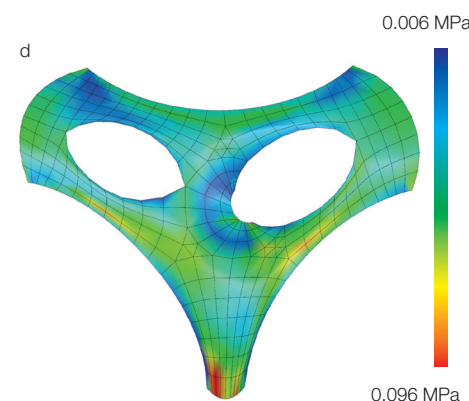
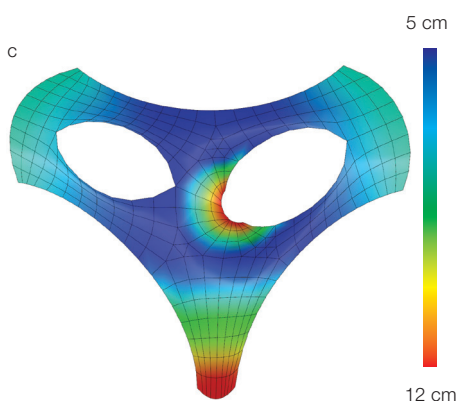
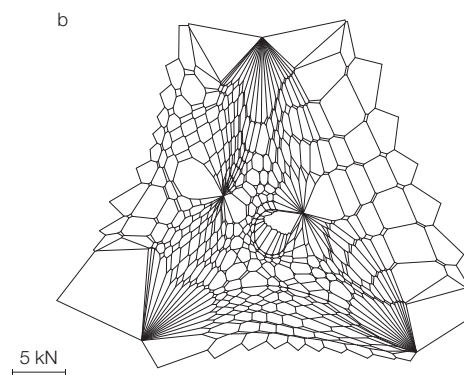
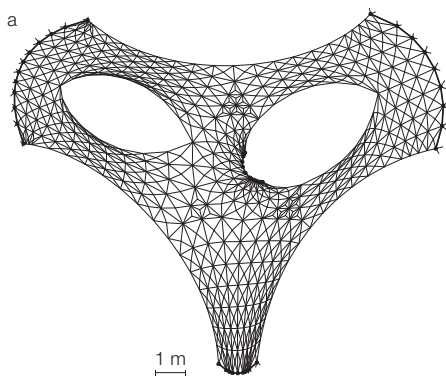
and one internally. Two large openings allowed the structure to be drawn round existing columns in the heritage listed exhibition space. One of the openings extends further down to afford a more interesting visual perspective and to create greater curvature. The footings for the structure consist of 20 mm steel plates, which were designed to distribute the weight of the vault evenly over a large enough area to reduce the load on the floor of the protected building to the prescribed limit of 600 kg/m². A system of steel ties connects the supports and resists horizontal loads at the bearing points. The ties, which were necessary because physical connections to the floor were not permitted, were

left exposed as a visual expression of the load-bearing system.

Structural design and analysis

The special geometry of the vault, which allows it to stand like a three-dimensional puzzle – subject only to compression loading – was the outcome of a form-finding and optimization process based on thrust network analysis. This new, computer-based method offers greater scope for the structural exploration of (inverted) suspended models – comparable to the physical form-finding techniques that were used in the construction of shell structures by designers like Antoni Gaudí and Heinz Isler. The dead weight of the vault was taken into account to define the central geometry of the structure. By establishing local thicknesses, it was possible to determine the inner and outer surfaces – the intrados and extrados. Based on material tests, the minimum required thickness of the individual blocks was specified as 5 cm in order to avoid spalling of the stone as a result of eccentric loading at the interfaces. For both structural and aesthetic reasons, the thickness was increased towards the footings to 8 cm along the linear supports and 12 cm at the central bearing point. The form of the vault was divided into courses, which in turn were articulated into individual blocks. By staggering the blocks and aligning the courses in accordance with the flow of forces and the edge lines, a stable interlocking of all stones was guaranteed. The stability of the unreinforced, dry assembly when subject to different forms of loading – including point loads, settlement at the supports, and earthquakes – was analysed and the results verified using the discrete element method (DEM).

Architectural geometry and fabrication To optimize their fabrication, the individual blocks have only convex top and bottom surfaces, which facilitates an efficient fitting process with a circular saw. Since the vault has a number of areas with negative Gaussian curvature, it was not possible to create the requisite geometry with both plane and convex surfaces. Adjacent flat and convex areas in the outer face were, therefore, separated and





8



9

a stepped exterior was created to the vault. In view of the limited time frame and the large number of blocks to be laid, the main goal in the fabrication process was to reduce the average cutting time for each stone. In addition, since there is no mortar between the blocks to provide tolerances, the interfaces had to be finished flush and therefore precisely cut and set. The outer face of each stone is flat to avoid having to turn the stones during machining of the other surfaces. The underside was formed by closely spaced cutting with a circular saw, leaving thin, comb-like stone fins. These were hammered off manually to create a rough-textured, double-curved surface. The side faces at right-angles to the flow

of forces were custom processed with profiling tools to create plane tongued-and-grooved surfaces. The grooves serve primarily as a reference geometry to aid the assembly, although they also prevent local movement between stones. The other edges of the stones were cut in a simple, planar form.

Construction

A test assembly of the vault was carried out to allow the stonemasons to familiarize themselves with the process. At the construction stage, all the stones were supported by a centring structure, consisting of standard scaffolding with a custom-made wooden grid on top. The blocks were laid manually, start-

- 8 Während des Aufbaus wurden die Steine durch ein Lehrgerüst gestützt.
- 9 Das passgenaue Platzieren der Steine mittels Holzkeilen wurde durch Registrationsmarker auf den Steinseitenflächen sichergestellt.
- 10 a Gleichgewichtsform als 3D-Mesh
b Linien zur Definition der Steinreihen
c Anordnung der sequentiellen Einschnitte auf der Gewölbeinnenseite
d Segmentierung der Gewölbefläche

- 8 The stone blocks are supported by centring during the assembly process.
- 9 Wooden wedges are used to ensure a perfect fit of individual blocks. The precise position of stones is registered on their side faces.
- 10 a Equilibrium diagram as three-dimensional grid
b Lines defining stone courses
c Layout of cutting lines on underside of vault
d Tessellation of individual stones

ing at the supports and converging upwards towards the “keystone” courses at the top. The correct placement of each stone was controlled with registration marks on the load-bearing interfaces, and the blocks were adjusted in position with wooden wedges according to precise measurements at their outer corners when the structure was almost complete. Finally, the keystones were cut, based on measurements of the partially assembled structure. In this way, it was possible to compensate for any cumulative imprecision in the fabrication and erection processes. Before removing the centring, the actual geometry of the assembled structure was recorded, and the position of each stone relative to its neighbours was marked on adjoining faces. By gradually removing the centring, a specific sequence was established, proceeding in a circle from one scaffolding tower to the next in several rounds. Once the wedges between the wooden grid and the stones began to fall out, the shell was de facto self-supporting. The stones and centring were subsequently shipped to the exhibition site, where the entire process was repeated in less than three weeks by the same construction team. At the end of the Venice Architecture Biennale, the structure will be dismantled again and reassembled in a permanent location.

Concluding remarks

The Armadillo Vault was the outcome of a close collaboration between engineers, designers, skilled stonemasons and master builders. It marks the culmination of more than ten years' joint research in stone construction. The structure demonstrates that, with advanced, bespoke engineering and innovative design methods, forms with an expressive geometry can be safely conceived and executed. The vault is based on the same structural and constructional principles as the stone cathedrals of the past. It is not a romantic attempt to revive Gothic architecture, however. As thin as an eggshell, in proportion, and without steel reinforcement, this expressive stone form stands secure and challenges the notion that complex geometry inevitably results in an inefficient use of materials.

